

*Hydrogeologie des Murgtals
(Kt. Thurgau)*

*Kurzfassung der an der Universität Neuenburg eingereichten Dissertation. Datum der Expertenprüfung:
23. April 1980*

WERNER BALDERER, Bolligen/Bern

Neuchâtel 1980

Hydrogeologie des Murgtales (Kt. Thurgau)

Kurzfassung der an der Universität Neuenburg eingereichten Dissertation. Datum der Expertenprüfung: 23. April 1980

WERNER BALDERER, Bolligen/Bern

Zusammenfassung

Das Murgtal ($F = 212 \text{ km}^2$) liegt im nordöstlichen Teil des schweizerischen Mittellandes und gehört zum Einzugsgebiet der Thur.

Die Landschaftsformen sind im oberen Teil des Einzugsgebietes (oberhalb Fischingen) stärker durch die Flusserosion, im übrigen Einzugsgebiet vorwiegend durch die glaziale Erosion und Akkumulation geprägt.

Der anstehende Fels wird im gesamten Einzugsgebiet der Murg durch die Schichten der Oberen Süsswassermolasse (OSM, Tortonien), welche zu den Ablagerungen des Hörnlschuttfächers gehören, gebildet. Die Grundwasserverhältnisse der OSM wurden für das Einzugsgebiet des Aubachs (südlich Fischingen) im Detail studiert: Als Quellgrundwasserleiter wirken (infolge primärer sowie sekundärer Durchlässigkeit und Porosität) Sandstein- und Nagelfluhorizonte, als Stauhorizonte dagegen Mergelschichten und Süsswasserkalkbänke. Da die OSM des Hörnlschuttfächers im Aubachgebiet durch horizontale Lagerung sowie durch Wechsellagerung der verschiedenen lithologischen Horizonte (in wechselnder Ausbildung und Mächtigkeit) charakterisiert ist, wird eine Verbindung der durchlässigen Horizonte einzig durch Schichtlücken, infolge der häufig auftretenden Faziesübergänge, ermöglicht. Dadurch ist aber eine Speisung der unteren durchlässigen Schichten durch die darüberliegenden innerhalb der Ablagerungen der OSM des Aubachgebietes denkbar, sodass diese als Gesamtkomplex ein Hydrogeologisches Gesamtsystem bilden. Die Nutzung der Grundwasservorkommen der OSM erfolgt ausschliesslich durch Quellen, welche eine mittlere Ergiebigkeit von $1,0\text{--}20 \text{ l/min}$ aufweisen.

Die Lockergesteinsablagerungen sind zum grössten Teil glazialer, fluvioglazialer und teilweise auch rein alluvialer Herkunft. Im Gebiet des Murgtales werden vorwiegend die Lockergesteinsgrundwasservorkommen in den Talsohlen genutzt, welche entlang des Murglaufes ab Fischingen bis gegen Frauenfeld (Aumühle) vorhanden sind.

Der Grundwasserleiter wird aus einem fluvioglazialen bis alluvialen Schotter gebildet. Dieser ist maximal 50 m (Dussnang-Kurhaus), minimal einige bis 1 Meter (im Bereich der Schwellenzonen) mächtig und besitzt eine Durchlässigkeit von rund $2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, die effektive Porosität dürfte $10\text{--}20\%$ betragen.

Für das Studium der hydrologischen Grössen der Wasserbilanz wurden die Einzugsgebiete der Murg bis Wängi ($F = 78,0 \text{ km}^2$) und des Aubachs bis Fischingen ($F = 3,82 \text{ km}^2$) ausgewählt. Für beide Einzugsgebiete wurde der Gebietsniederschlag aus dem arithmetischen Mittel der geprüften sieben Basisstationen unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit bestimmt (durch lineare Regression), so dass eine möglichst repräsentative Erfassung der zeitlichen und räumlichen Verteilung des Niederschlags gewährleistet ist.

Die Gebietsverdunstung wurde indirekt, als Restgrösse aus der Jahreswasserbilanz, bestimmt. Die weitere zeitliche Verteilung der Jahres(brutto)-Verdunstung erfolgte entweder entsprechend den gemessenen Relativwerten des Wasserbilanzschreibers oder als Restgrösse aus der monatlichen Wasserbilanz (durch monatliche Bestimmung der Abflussreserven nach Maillet) oder durch Kombination der beiden Bestimmungsmethoden. Diese ergibt unter den gegebenen messtechnischen Möglichkeiten die genaueste mögliche Erfassung sowohl der Gebietsverdunstung als auch der Abflussreserve für Monatswerte.

Das Grundwasservorkommen entlang des Murglaufes von Dussnang bis Wängi wurde ausserdem durch ein mathematisches Strömungsmodell (Finite-Element-Methode) dargestellt. Das grosse hydrologische

Einzugsgebiet ausserhalb des Grundwasservorkommens machte die Erarbeitung einer speziellen Methode zur Abschätzung der seitlichen Zuflüsse notwendig (Methode der maximalen seitlichen Infiltrationsraten $q_{\text{inf,max}}$).

Résumé

Le bassin versant de la Murg (surface totale 212 km^2) est situé dans la partie nord-est du plateau suisse et appartient au bassin versant de la Thur.

La forme morphologique est caractérisée dans la partie supérieure du bassin par l'effet d'érosion des torrents (avec des collines à forte pente, des ravins avec des glissements de terrain), dans les autres parties du bassin par les traces des événements glaciaires. Dans tout le bassin, la roche affleurante est constituée par des formations de molasse d'eau douce supérieure (Tortonien), mais souvent recouvertes par des roches meubles du quaternaire.

Les propriétés hydrogéologiques de la molasse d'eau douce supérieure ont été étudiées en détail dans la partie supérieure du bassin de la Murg, dans le bassin de l'Aubach. Cette molasse est caractérisée par une stratification horizontale et une sédimentation rythmique.

Les déterminations de la perméabilité à partir du débit des sources et les observations de terrain ont conduit à la postulation d'un schéma théorique de l'écoulement souterrain dans l'ensemble du complexe sédimentaire de la molasse d'eau douce supérieure (Hydrogeologisches Gesamtsystem):

L'eau s'infiltre et est emmagasinée dans les couches poreuses et perméables (grès et conglomérats de type «Nagelfluh») qui sont entourées de niveaux imperméables (marnes et calcaires d'eau douce). Elle circule soit le long des couches (horizontalement) et ressurgit à la surface le long de la pente topographique en formant des sources, soit elle continue à circuler à l'intérieur du massif rocheux en passant aux niveaux inférieurs par des points de communication des niveaux perméables qui sont dus à des lacunes des niveaux séparants imperméables (à cause des changements du faciès de sédimentation).

Les roches meubles du quaternaire sont d'origine glaciaire, fluvioglaciaire ou alluviale. Elles forment le remplissage des fonds de vallées comme aussi les dépôts latéraux.

Le remplissage de la vallée de la Murg est constitué principalement par des dépôts d'alluvions grossiers, des graviers fluvioglaciaires, mais il y existe aussi des dépôts de moraines de fond et des sédiments lacustres. Le substratum rocheux de la vallée de la Murg, qui est constitué par de la molasse, présente un relief d'érosion glaciaire, avec des bassins d'érosion séparés par des seuils. La perméabilité des graviers constituant l'aquifer est en moyenne environ $2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$.

La porosité efficace se situerait selon les déterminations des essais de pompage en état transitoire (formule de Theis) et des estimations à partir de la granulométrie des échantillons des forages entre 5 et 10% pour la partie entre Dussnang et Münchwilen, et autour de 25% à partir de Rosental jusqu'à Murkart (Frauenfeld).

L'étude des paramètres du bilan hydrologique a été effectuée pour les bassins versants de la Murg jusqu'à Wängi (surface 78 km^2) et de l'Aubach jusqu'à Fischingen (surface $3,82 \text{ km}^2$). Les valeurs moyennes des précipitations des deux bassins ont été déterminées par voie statistique par la détermination (à l'aide des régressions linéaires) d'une relation entre les moyennes arithmétiques des mesures de sept stations de référence et le gradient des précipitations en fonction de l'altitude.

L'évapotranspiration annuelle moyenne du bassin a été calculée par le déficit d'écoulement. La distribution temporelle a été déterminée, soit à l'aide des valeurs mesurées relatives (du Wasserbilanzschreiber) soit par une voie indirecte par la détermination de la réserve d'écoulement mensuelle d'après la formule de Maillet et des bilans mensuels, soit par une combinaison des deux méthodes au courant de l'année hydrologique.

La nappe phréatique de la vallée de la Murg entre Dussnang et Wängi a été représentée par un modèle de simulation de l'écoulement hydrodynamique selon la méthode des éléments finis.

La grande surface du bassin versant hydrologique en dehors de la surface affleurante de la nappe phréatique (= bassin hydrogéologique), a nécessité l'élaboration d'une méthode nouvelle de détermination des apports d'alimentation latéraux par voie indirecte (méthode des taux d'infiltration latérales maximales $q_{\text{inf,max}}$).

Abstract

The Murg river basin (tributary of the Thur-river) is situated in the north-eastern part of Switzerland. Its morphology is fashioned mainly

by river erosion in the upper part and by the erosion during the pleistocene glaciation events in the other parts. The bed-rock is formed by the consolidated nearly horizontal stratified fan deposits of the «Upper Freshwater Molasse» (Tortonian), often covered by non-consolidated quaternary deposits. The hydrogeological properties of this «Upper Freshwater Molasse» have been studied for a smaller area, for the Aubach catchment. These deposits, belonging to the «Hörnli-Fan», consists of clastic sediments: conglomerates (Nagelfluh), sandstones, marls and freshwater limestones. By mapping the lithological structure and the origins of observed springs the following conceptual model for the hydrodynamic behaviour was deduced: The precipitation water infiltrates at surface in the permeable layers (conglomerates and sandstones) which are interbedded within impermeable layers (freshwater limestones and marls). Once entered in this sedimentary complex itself, two possibilities for the circulating water exists: wether it continues to circulate along always the same layer (strate) and is flowing outside at the rock surface in forming springs, or it circulates through lithologically caused connections (by changes in the sedimentary facies) down to the next deeper permeable layer. In this way, the sedimentary complex of the Upper Freshwater Molasse is forming a system of interconnected aquifer layers (Hydrogeologisches Gesamtsystem, [figures 3, 4]).

In the Murg valley itself the existing aquifer in the alluvial plain has been studied. The aquifer rock consists in sandy(-silty) gravels. It reaches a maximal thickness of about 50 m (water filled ca. 35 m) in zones where the bedrock was eroded by glaciers and a minimal thickness of about 1 m in the non eroded step-zones. Its average permeability is about $2 \cdot 10^{-3}$ m/s, its porosity about 5–10 % in the true fluvioglacial deposits (higher values up to 25 % exist in the coarser river-channel deposits in the downstream part of the basin).

The hydrological water balance has been established for two smaller catchments: 1. the upper part of the Murg basin (with the gauging station at Wängli, surface 78 km²), 2. for the Aubach basin (surface 3,82 km²). For the two basins, the monthly evapotranspiration rate was determined by experimental measures and by deduction from the water balance (with separately determined base flow) or by a combination of these two methodes during the hydrological year.

Finally a numerical model of the groundwater flow for the Murg-river alluvial plain aquifer after Galerkin's finite-element-method has been developped. The vastes surfaces outside the alluvial plain aquifer induced the developpement of a new method to estimate the lateral (subsurface) flow into the aquifer (method of maximal lateral infiltration rate $q_{inf. max.}$).

Morphologie

Das Murgtal (Gesamteinzugsgebietsfläche $F = 212$ km²) liegt im nordöstlichen Teil des schweizerischen Mittellandes, in der Region des Hinterthurgaus, und gehört zum Einzugsgebiet der Thur. Es erstreckt sich vom nördöstlichen Teil des Hörnliberglandes bis nach Frauenfeld. Innerhalb des gesamten Einzugsgebietes der Murg besteht der anstehende Fels aus den Schichten der Oberen Süsswassermolasse (OSM, Tortonien), welche Ablagerungen des Hörnlichuttfächers darstellen [1, 2, 3, 4].

Im Oberlauf der Murg (oberhalb Fischingen, innerhalb des Hörnliberglandes) sind die Landschaftsformen vorwiegend durch die fluviale Erosion (Wildbäche, steile Tobel, häufig mit Rutschungen) und das ausgeprägte Relief der Hügel aus anstehender Molasse gekennzeichnet [5]. Die Anlage des Flussnetzes zeigt deshalb die typische dendritische Ausbildung.

Das übrige Einzugsgebiet der Murg ist stärker durch die glazialen Vorgänge (Erosion und Akkumulation) geprägt. Die Anlage des Flussnetzes zeigt denn auch eine asymmetrische (oft lokal dendritische) Ausbildung, entsprechend den glazial erodierten Haupttälern (siehe Figur 1).

Diese morphologischen Unterschiede, welche sowohl durch unterschiedliche Erosionsformen als auch durch

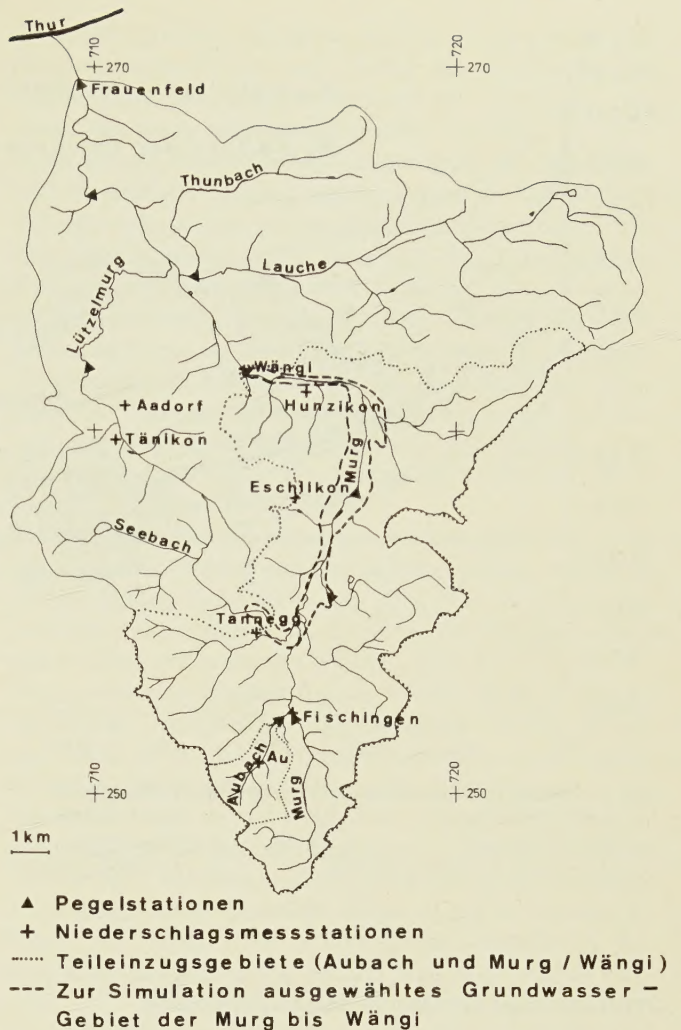


Fig. 1 Flussnetz der Murg

Unterschiede der Geologie (vorwiegend anstehende Molasse im Hörnligebiet, vorwiegend quartäre Lockergesteinsablagerungen im übrigen Einzugsgebiet) hervorgerufen werden, sind auch in der Verteilung der Höhenstufen innerhalb der Teileinzugsgebiete (Hypsographische Kurven) zu erkennen. Hypsographische Kurven (siehe Figur 2), welche eine symmetrische Verteilung der Flächen der verschiedenen Höhenstufen zeigen (z.B. Kurven der Einzugsgebiete des Aubachs und der Murg bis Fischingen) deuten auf ein Vorherrschen der fluvialen Erosion, hingegen grössere Häufigkeiten der Flächen der unteren Höhenstufen auf einen grösseren Einfluss der glazialen Erosion hin. (Diese Verteilung der Höhenstufen kann auch durch den Vergleich des Mittels der Extremwerte

$\frac{H_h + H_t}{2}$ mit dem gewichteten Gebietsmittel, der mittleren Einzugsgebietshöhe H_m charakterisiert werden; wobei bei $\frac{H_h + H_t}{2} \sim H_m$ bei Flusserosion, sowie $\frac{H_h + H_t}{2} \gg H_m$ bei vorwiegend glazialer Erosion).

Neben diesen natürlichen Einflüssen sind auch Veränderungen der Landschaft infolge der Korrekturen der Murg (welche nach der Hochwasserkatastrophe von 1876 in Angriff genommen wurden) und dem Bau von Anlagen zur Nutzung der Wasserkraft (Kanäle, Staubecken) vorhanden [6, 7].

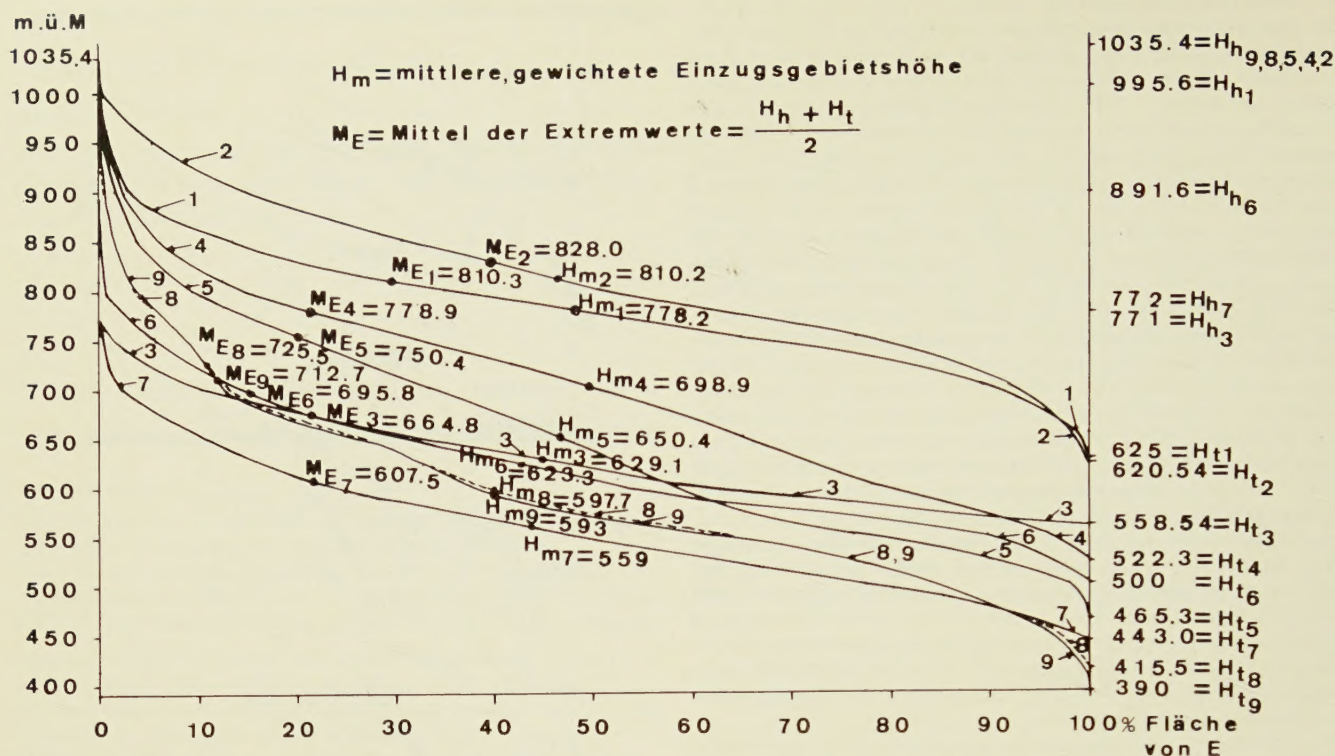


Fig. 2 Hypsographische Kurven der verschiedenen Einzugsgebiete

- | | |
|-----------------------------------|------------------------|
| 1: Aubach/Fischingen | 4: Murg/Sirnach |
| 2: Murg/Fischingen | 5: Murg/Wängi |
| 3: Littenheider-Anwilerbach/Anwil | 6: Lützelermurg/Aadorf |

- | |
|----------------------------------|
| 7: Lauche und Thunbach/Matzingen |
| 8: Murg/Aumühle |
| 9: Murg/Frauenfeld |

Hydrogeologie der Oberen Süsswassermolasse

Die Lithologie der Ablagerungen der Oberen Süsswassermolasse ist im Aubachgebiet (bei horizontaler Lagerung) durch vertikal alternierende Schichtung, mit unvollständigen Sedimentationszyklen und häufig vorkommenden horizontalen Faziesübergängen charakterisiert. Diese Ablagerungsform ist als eine Land-/Flusssedimentation zu deuten, mit Seen, Sümpfen, Stromrinnen und Landflächen, welche zeitweise überflutet wurden. Die lithologischen Hauptglieder eines vollständigen Sedimentationszyklus sind dabei Nagelfluh (zu Beginn einer neuen Schüttung), Sandstein, Mergel und Süsswasserkalk (am Ende eines vollständigen Zyklus, zum Teil noch von Süsswasserkohle überlagert). Die einzelnen lithologischen Einheiten können wie folgt charakterisiert werden (wobei aber häufig auch Übergangsformen vorkommen): Die Nagelfluhhorizonte sind oberhalb 800 m ü. M. 10–20 m mächtig, grobkiesig, relativ stark verfestigt, mit subvertikalen Klüften, lokal weniger verfestigten Partien mit Lösungserscheinungen; unterhalb 800 m noch 2–5 m mächtig, relativ wenig verfestigt, mit Geröllen in Kies-, Sandfraktion und sandig-karbonatischem bis sandig-lehmigem Zement. Die horizontale Ausdehnung der Bänke beträgt einige 100 m.

Die Sandsteine sind in zwei Typen, als harte, mittelgrobkörnige, geklüftete, 0,2–1 m mächtige Bänke sowie als lockere, mittel- bis feinkörnige (siltige), einige Zentimeter bis 15 m mächtige Horizonte (vor allem im tieferen Teil des Einzugsgebietes) verbreitet.

Die Mergel sind einige Zentimeter bis 10 m mächtig, dünn geschichtet (0,5–2 cm) und sandig-siltig-tonig bis tonig-kreidig-kalkig ausgebildet.

Die Süsswasserkalke sind 0,5–5 m mächtig, entweder als harte, dichte massige Bänke (ähnlich Malmkalken) oder in mergelig-sandiger Varietät ausgebildet.

Durch Beobachtung der Quellen, ihrer Austrittsstelle und der Lithologie der Quell- und der Stauhazone konnte für die lithologischen Einheiten folgende relative Klassierung der Durchlässigkeiten vorgenommen werden:

$$K_{Sst(grob-mittelkörnig)} > K_{NF} > K_{Sst(mittel-feinkörnig)} \\ > K_{S.W.Kalk} > K_{Mergel} > K_{Ton}$$

Durch die Ergiebigkeit der Quellen konnte mit Hilfe von speziell entwickelten Formeln die Durchlässigkeit der betreffenden Quell- (bzw. Speicher-)horizonte entsprechend der lokalen lithologischen Situation bestimmt werden. Die Mittelwerte der Bestimmungen ergeben folgende Grössenordnungen der Durchlässigkeiten der einzelnen lithologischen Einheiten:

$$K_{Sst(grob-mittelkörnig)} > K_{NF} > K_{S.W.Kalk} \\ (1.1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}) > (3.25 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}) > (6.2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}) \\ > K_{Mergel} \\ > (1.7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s})$$

Die Durchlässigkeit der feinkörnigen Sandsteine konnte nicht direkt bestimmt werden, sie dürfte zwischen jener der Nagelfluh und des Süsswasserkalkes, in der Grössenordnung von $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s oder weniger liegen.

Die Durchlässigkeit der tonig-siltigen Mergel und der reinen Tone liegt noch unter dem Wert der Mergel.

Nach einer Abschätzung mit Hilfe des Trockenwetterabflusses des Aubachs bei Fischingen beträgt die mittlere Durchlässigkeit des Aubachgebietes als Ganzes rund $1,87 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Alle diese Bestimmungen wurden mit Hilfe von adaptierten Formeln durchgeführt, angewandt auf die einzelnen Quellen entsprechend der Theorie von Dupuit. Diese Werte sind deshalb für die hydraulischen Systeme der betreffenden Quellen gültig. Um Aussagen über die Durchlässigkeit der Ablagerungen der OSM in ihrer gesamten Ausdehnung zu gewinnen, sind weitere Untersuchungen notwendig, welche näheren Aufschluss über die räumliche Verteilung der Durchlässigkeit und Porosität innerhalb der Ablagerungen ergeben. Es muss aber als sicher angenommen werden, dass innerhalb der einzelnen grundwasserleitenden (Speicher-)Horizonte durchlässigere und undurchlässigere Partien, hervorgerufen durch Klüftung, durch lokale Unterschiede der Sedimentation (Schüttungsunterschiede, Stromrinnen) sowie durch lokale Lösungserscheinungen, bestehen. Deshalb muss angenommen werden, dass die Durchlässigkeit der aktiven hydraulischen Systeme der einzelnen Quellen grösser ist als jene der umgebenden, nicht oder weniger einbezogenen Gesteinspartien.

Aufgrund der Feldbeobachtungen können ausserdem die lithologischen Einheiten der OSM auch hinsichtlich ihrer *nutzbaren Porosität*, sowohl qualitativ als auch quantitativ, durch Abschätzung der Grössenordnung, klassiert werden:

Speicher- gesteine

(K = mittelgross): $P_{SSt} > P_{NF} \approx 5-10\%$

Stauhorizonte

(K = klein): $P_{S.W.Kalk} > P_{Mergel} > P_{Ton}$ } je nach
oder $P_{Mergel} > P_{S.W.Kalk} > P_{Ton}$ } lith. Aus-
bildung

Die *Durchlässigkeit* und die (nutzbare) *Porosität* stellen nun *Variablen* dar, deren *räumliche Verteilung* innerhalb eines Gesteinsmassivs eine *Eigenschaft des Grundwassers* charakterisiert und welche zudem zueinander in einer *Äquivalenzbeziehung* stehen. Sie stellen deshalb in ihrer räumlichen Verteilung entsprechend der Definition von L. Kiraly (1978) *Hydrogeologische Einheiten* (HGE) bzw. *unités hydrogéologiques* (UHG) dar [8].

Aus den vorangehend dargestellten Beobachtungen und Bestimmungen darf der Schluss gezogen werden, dass auch zwischen der *Anordnung der Ablagerungen entsprechend den ausgewählten lithologischen Einheiten* und der *Verteilung der Durchlässigkeit und der Porosität Äquivalenzbeziehungen* bestehen. Dieser *lithologische Parameter* charakterisiert die räumliche Ausdehnung (Form, Geometrie) und Anordnung der Gesamtheit der wasserleitenden (und speichernden) Gesteinskörper innerhalb des Gesamtmassivs, er kann deshalb als *Hydrogeologische Einheit der Grundwasserleiter* oder, bei Kenntnis der Lage der lokalen Grundwasserspiegel als *Hydrogeologische Einheit der Grundwasservorkommen* bezeichnet werden. Somit stellt der lithologische Aufbau

der OSM innerhalb des Aubachgebietes eine weitere Hydrogeologische Einheit dar, welche die Anordnung und Ausdehnung der grundwasserleitenden Schichten, begrenzt von undurchlässigen Schichten, festlegt.

Nach diesen Überlegungen können nun die Nagelfluh- und Sandsteinhorizonte, welche gegenüber den übrigen Schichten durch eine grössere Durchlässigkeit und Porosität charakterisiert sind, innerhalb der lithologischen Kartierung des Aubachgebietes qualitativ als grundwasserleitende und speichernde Horizonte, die übrigen Ablagerungen hingegen als undurchlässige Stauhorizonte betrachtet werden. Die damit aus der (synthetischen) lithologischen Kartierung hervorgehende Situation der Anordnung der grundwasserleitenden und speichernden Horizonte kann durch die schematische Darstellung in Figur 3 charakterisiert werden.

Der ganze Gesteinskomplex der Ablagerungen der OSM bildet also ein System von Grundwasserleitern, welche an einigen Stellen verbunden, aber auch über weite Strecken voneinander getrennt sind. Aufgrund der Beobachtungen muss dabei angenommen werden, dass der Austritt des Wassers an den Quellen frei, d.h. unter dem an der betreffenden Austrittsstelle herrschenden Druck erfolgt und somit die Grundwasservorkommen der grundwasserleitenden Horizonte *seitlich durch freie Wasserspiegel* begrenzt werden. – Werden nun diese freien Grundwasserspiegel als seitliche Begrenzung der Grundwasservorkommen mitberücksichtigt, so kann aus der schematisch dargestellten Situation (Figur 3) der Grundwasserleiter und -stauer eine (schematische) Anordnung der Grundwasservorkommen gemäss Figur 4 gewonnen werden.

Die Ablagerungen der OSM des Hörnlischuttfächers bilden also einen Hydrogeologischen Gesamtkomplex, bestehend aus durchlässigen Schichten, welche die einzelnen, zum Teil zusammenhängenden Grundwasservorkommen darstellen und aus (relativ) undurchlässigen Schichten, welche Trennungsflächen darstellen, in bestimmter, gegebener Anordnung, so dass die einzelnen Grundwasservorkommen nach unten (in vertikaler Richtung) durch undurchlässige Grenzen sowie seitlich und nach oben entweder durch freie Wasserspiegel oder eine undurchlässige Schicht begrenzt werden. Diese Definition stellt eine Erweiterung der ursprünglichen Definition der Hydrogeologischen Einheit HGE-5 nach L. Kiraly (1978) dar [8, 9].

Gemäss der Theorie der Hydrogeologischen Einheiten ist es nun möglich, über die Kenntnis der Verteilung der Durchlässigkeit (HGE-2), der Porosität (HGE-3) sowie der Ausdehnung der Grundwasservorkommen (HGE-5) und der Randbedingungen (HGE-4), Aussagen über die hydrodynamischen Fliessysteme (HGE-1) bzw. das hydrogeologische Gesamtsystem zu gewinnen.

Im Fall des Aubachgebietes können qualitativ folgende Typen von Randbedingungen unterschieden werden (s. Figur 3):

- Speisung entlang der Oberfläche der durchlässigen Schichten durch Infiltration der Niederschläge, durch Re-Infiltration eines Teils des Abflusses höher liegender Quellen (zum Teil erhöht durch untiefen Bodenabfluss).

Abschnitt Sirnach (Büfelden)–Münchwilen: Breiter, jedoch relativ flacher Talquerschnitt, ehemaliges Zungenbecken.

Abschnitt Münchwilen–St. Margarethen: Weiteres Zungenbecken, durch den Molassesporn bei Münchwilen vom oberen Zungenbecken abgetrennt, bildet den breitesten Talquerschnitt des Murgtales.

Abschnitt St. Margarethen (unterhalb Ortschaft Murgtal) bis Wängi (Dorf): Durch unterhalb der Ortschaft Murgtal anstehende Molasseschwelle vom oberhalb liegenden Talabschnitt abgetrennt, durch eine Änderung der Talrichtung von SN nach OW sowie durch eine schmale, glazial wenig bearbeitete Talrinne charakterisiert.

Abschnitt Wängi (Dorf) bis Aumühle: Der von SO nach NW verlaufende Talabschnitt zeigt einen flachen Talquerschnitt mit sehr geringer Übertiefung. Bei der flach verlaufenden Talsohle kommt deshalb der Lage des ursprünglichen, vor der Korrektur bestehenden, zum Teil in den Fels erodierten Murglaufes grosse Bedeutung bezüglich der Lage und Nutzung der einzelnen lokalen Grundwasservorkommen zu.

Die *Felsunterlage* besteht aus Schichten der Oberen Süsswassermolasse, wobei von Dussnang talabwärts die Mergel- und Sandsteinschichten zunehmen, gleichzeitig die Nagelfluhorizonte zurücktreten und nur noch im Bereich der Schwellenzonen anzutreffen sind.

Die *undurchlässige Sohle* des Grundwasserleiters wird entweder durch anstehenden Molassefels, Grundmoräne oder Seesedimente gebildet.

Deckschichten, bestehend aus feinkörnigen Ablagerungen, sind talabwärts unterhalb Dussnang in geringmächtiger Ausbildung (0,5–3 m) fast überall vorhanden. Sie bewirken lokal gespannte Grundwasserspiegel (im Gebiet von Sirnach–Münchwilen, zwischen Rosental und Wängi).

Die *Durchlässigkeit* des aus einem sandigen, z.T. leicht lehmigen Kies bestehenden *Grundwasserleiters* wurde durch Auswertung der Pumpversuche der vorhandenen Bohrungen bestimmt. Sie variiert zwischen $1,26 \cdot 10^{-4}$ m/s (Bohrung 113 St. Margarethen) und $1,76 \cdot 10^{-1}$ m/s (P.W. Wiezikon); für das Murgtal zwischen Dussnang und Wängi dürfte im Mittel rund $2 \cdot 10^{-3}$ m/s angenommen werden.

Ein Vergleich dieser in situ bestimmten Durchlässigkeitswerte mit den aus den Modellsimulationen (nach erfolgter Eichung im stationären Zustand) hervorgehenden Werten, welche Mittelwerte je eines Teilelementes darstellen, zeigt für das Grundwassergebiet von Dussnang–Wängi eine Übereinstimmung innerhalb der Grössenordnung [13].

Nach den Ergebnissen der direkten Bestimmungen durch Auswertung der Pumpversuche im instationären Zustand (Formel von Theis usw.) sowie nach Abschätzung mit Hilfe der Korngrösse, dürfte die nutzbare *Porosität des Grundwasserleiters* zwischen Dussnang und Münchwilen 5–10%, im Bereich von Rosental–Wängi–Murkart bis 25% betragen.

Die *Grundwassermächtigkeit* beträgt bei Dussnang maximal 42 m (Fassung Kurhaus), nimmt anschliessend gegen die Schwellenzone Wiezikon–Horben bis auf einige Me-

ter ab, erreicht im Becken von Büfelden–Sirnach 5–14 m (Fassungen von Eschlikon, Sirnach und Münchwilen), im Becken von Münchwilen–St. Margarethen 3–5 m. Im anschliessenden Talabschnitt ab Murgtal–Rosental bis nach Frauenfeld (Aumühle) sind nur noch Grundwassermächtigkeiten von einigen bis 1 m vorhanden.

Das *Grundwasser* wird durch die Infiltration der Niederschläge in der Talsohle, durch seitliche Hangzuflüsse sowie je nach Talabschnitt in unterschiedlicher Masse, durch Infiltrationen der Murg gespeist.

Die Grundwasservorkommen des Murgtales werden von Dussnang bis Murkart (oberhalb Frauenfeld) *genutzt*. *Günstige Verhältnisse für eine Nutzung* sind dabei im Abschnitt Dussnang bis Wis (oberhalb Wiezikon) und im Abschnitt Büfelden–Sirnach–Münchwilen vorhanden.

Ungünstige Verhältnisse für eine Nutzung bestehen im unteren Talabschnitt ab der Ortschaft Murgtal (Rosental) bis nach Murkart, da der Grundwasserleiter von geringer Ausdehnung und Mächtigkeit ist und deshalb die Murginfiltration im Verhältnis grösser als der übrige Grundwasserzufluss ist.

Eine *Ausdehnung der Nutzung* mit Hilfe der bestehenden Fassungen ist im Abschnitt Büfelden–Sirnach–Münchwilen möglich. Für *neue Fassungen* bestehen im Abschnitt Dussnang bis Wis die günstigsten Voraussetzungen.

Eine *Grundwasseranreicherung* wäre vor allem im Raum Büfelden, im Bereich der Fassungen von Eschlikon, Sirnach und Münchwilen (Kirchenfeld) sinnvoll, da hier eine sehr grosse Nutzung, sowie die Möglichkeit einer zusätzlichen Speicherung besteht.

In den *Seitentälern zum Murgtal* (Lützelmußsystem, Littenheidertal, Lauchetal, Thunbachtal) sind entlang der Talsohlen nur Grundwasserleiter von relativ geringer Mächtigkeit (zwischen 5–10 m, um 20 m im Maximum) vorhanden, welche zudem infolge des oft inhomogenen Aufbaus und des (neben der Kiesfraktion) vorhandenen grossen Anteils an feinkörnigen Ablagerungen (Feinsand, Silt oder Lehm) oft nur eine geringe Durchlässigkeit (von $2 \cdot 10^{-4}$ m/s bis ca. $5 \cdot 10^{-4}$ m/s) aufweisen. Es sind deshalb in diesen Grundwasserleitern, welche zur Hauptsache Rinnenfüllungen (teilweise auch Seeablagerungen) darstellen, je nach lokaler Ausdehnung, Mächtigkeit und Durchlässigkeit im allgemeinen nur Fassungen mit Entnahmemengen von 100–600 l/min möglich.

Die Nutzung der *quartären Grundwasservorkommen ausserhalb der Talsohlen*, in Moränen, Schotterterrassen oder seitlichen Rinnenfüllungen erfolgt meistens durch Quellen, welche eine Ergiebigkeit in der Grössenordnung von 5–50 l/min aufweisen. Bei Grundwasservorkommen in Rinnenfüllungen sind aber auch Grundwasserfassungen mit Vertikalschächten möglich, wobei aber die Ergiebigkeit relativ klein ist, in der Grössenordnung von 200–400 l/min.

Hydrologie

Für das Studium der hydrologischen Grössen der Wasserbilanz wurden die Einzugsgebiete der Murg bis Wängi ($F = 78,0 \text{ km}^2$) und des Aubachs bis Fischingen ($F = 3,82 \text{ km}^2$) ausgewählt (s. Figur 1). Beide Einzugsgebiete (Test-

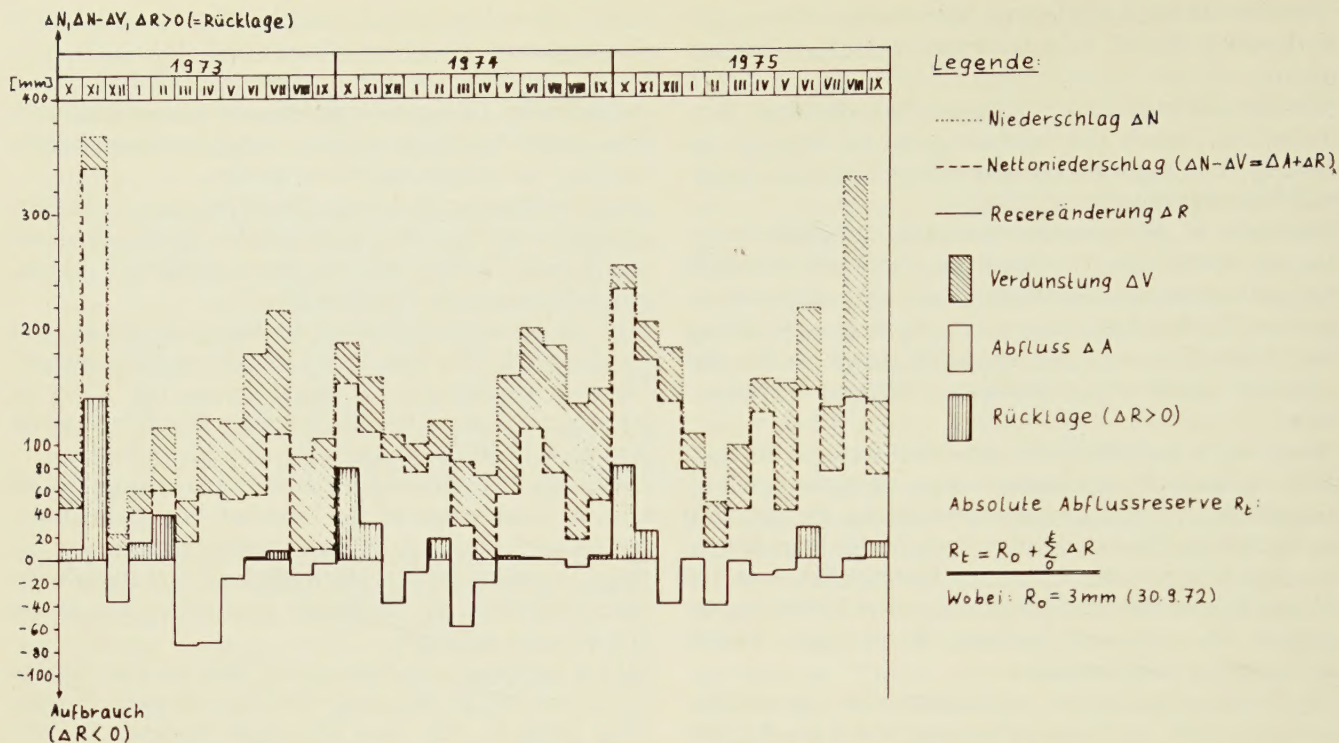


Fig. 5 Diagramm der monatlichen Wasserbilanz des Einzugsgebietes des Aubachs bis Fischingen ($\Delta N = \Delta V + \Delta A + \Delta R$).

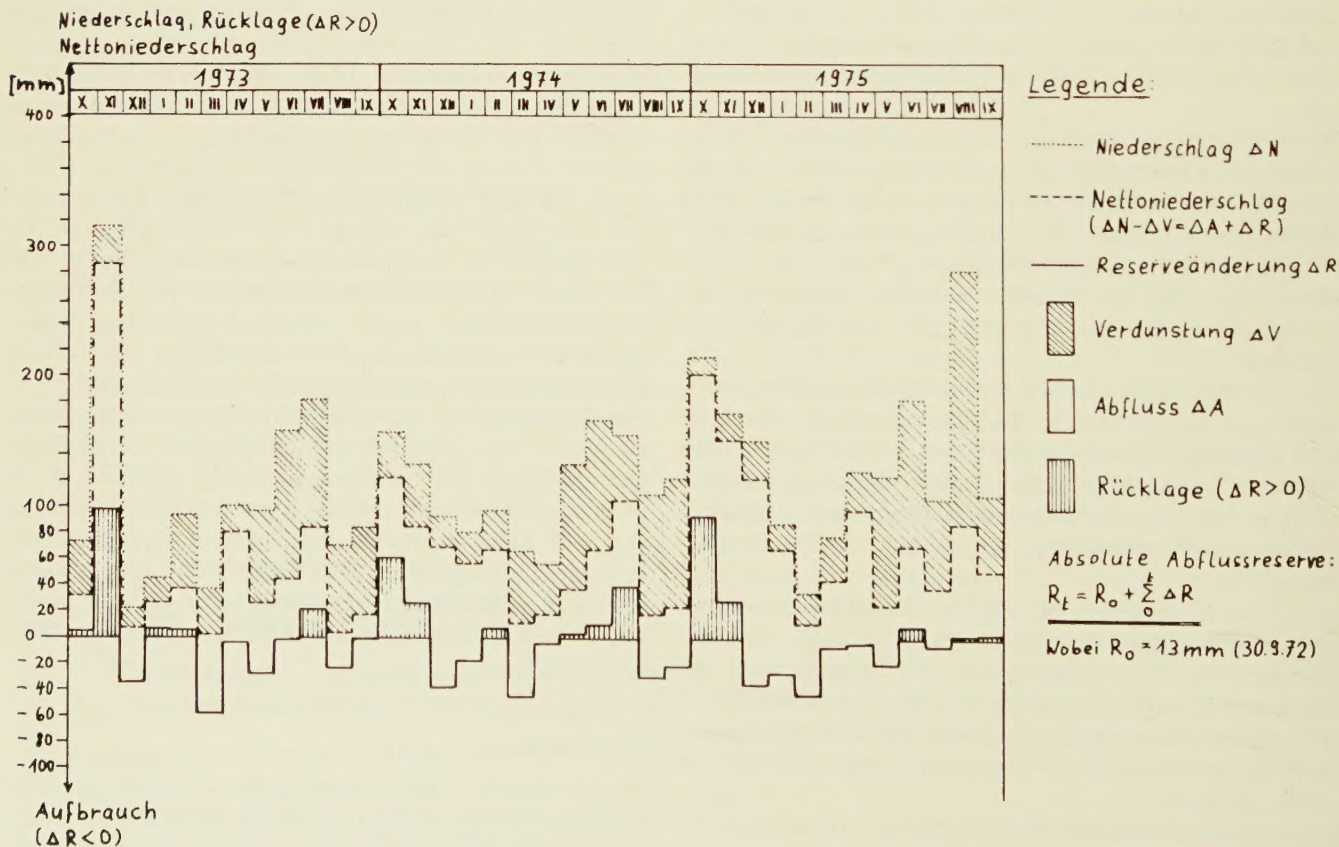


Fig. 6 Diagramm der monatlichen Wasserbilanz des Einzugsgebietes der Murg bis Wängi ($\Delta N = \Delta V + \Delta A + \Delta R$).

gebiete der Landeshydrologie) besitzen eine auf dem Felsuntergrund aufliegende Messstelle, was die Erfassung des Gesamtabflusses erlaubt [14]. Für beide Einzugsgebiete wurde der Gebietsniederschlag aus dem arithmetischen Mittel des Niederschlags [15] der geprüften sieben Basisstationen (Aadorf, Au, Eschlikon, Fischingen, Hunzikon, Tänikon, Tannegg) unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit bestimmt (durch lineare Regression), so dass eine möglichst repräsentative Erfassung der zeitlichen und räumlichen Verteilung des Niederschlags gewährleistet ist.

Die Gebietsverdunstung wurde indirekt, als Restgrösse aus der Jahreswasserbilanz bestimmt [13]. Die weitere zeitlich Verteilung der Jahres(brutto)-Verdunstung erfolgte entweder entsprechend den gemessenen Relativwerten des Wasserbilanzschreibers [16, 13], oder als Restgrösse aus der monatlichen Wasserbilanz (durch monatliche Bestimmung der Abflussreserven nach Maillet [17, 13], oder durch Kombination der beiden Bestimmungsmethoden [13]. Diese ergibt unter den gegebenen messtechnischen Möglichkeiten die genauest mögliche Erfassung sowohl der Gebietsverdunstung als auch der Abflussreserve für Monatswerte.

Die monatlichen kombinierten Wasserbilanzen der beiden Einzugsgebiete sind zusammenfassend für die hydrologischen Jahre 1954–1978 durch Säulendiagramme (Fi-

gur 5 und 6) dargestellt. Diese Säulendiagramme stellen für die Monatssummen Δ die allgemeine Wasserbilanzgleichung in der Form: $\Delta N = \Delta V + \Delta A + \Delta R$ dar. Darin sind die Monatssummen des Niederschlags (ΔN), des Nettoniederschlags ($\Delta N - \Delta V = \Delta A + \Delta R$) sowie der (Abfluss-) Reserveänderung (ΔR) durch Treppenkurven dargestellt. Die Werte der Verdunstung (ΔV) und des Abflusses (ΔA) lassen sich durch Differenzenbildung der Abszissenwerte der entsprechenden Kurven gewinnen. Den beiden Darstellungen ist zu entnehmen, dass die Verdunstung im jahreszeitlichen Verlauf stark von der Niederschlagshöhe abhängig ist, was auf eine Abhängigkeit der reellen Evapotranspiration von der verfügbaren Feuchtigkeitsreserve im ungesättigten Boden zurückzuführen ist.

In entprechender Weise sind auch die hydrologischen Jahresbilanzen der Einzugsgebiete der Murg bis Wängi für die hydrologischen Jahre 1954–1978 und des Aubachs bis Fischingen für die hydrologischen Jahre 1973–1978 in Diagrammform in der Figur 7 zusammenfassend dargestellt. Dieser Darstellung ist zu entnehmen, dass die Verdunstung innerhalb des Einzugsgebietes der Murg fast immer einen ähnlichen Betrag wie der Abfluss besitzt. Dagegen ist ein Zusammenhang zwischen der Verdunstung und dem Gebietsniederschlag fast nicht mehr vorhanden, da meistens eine hohe Niederschlagsmenge

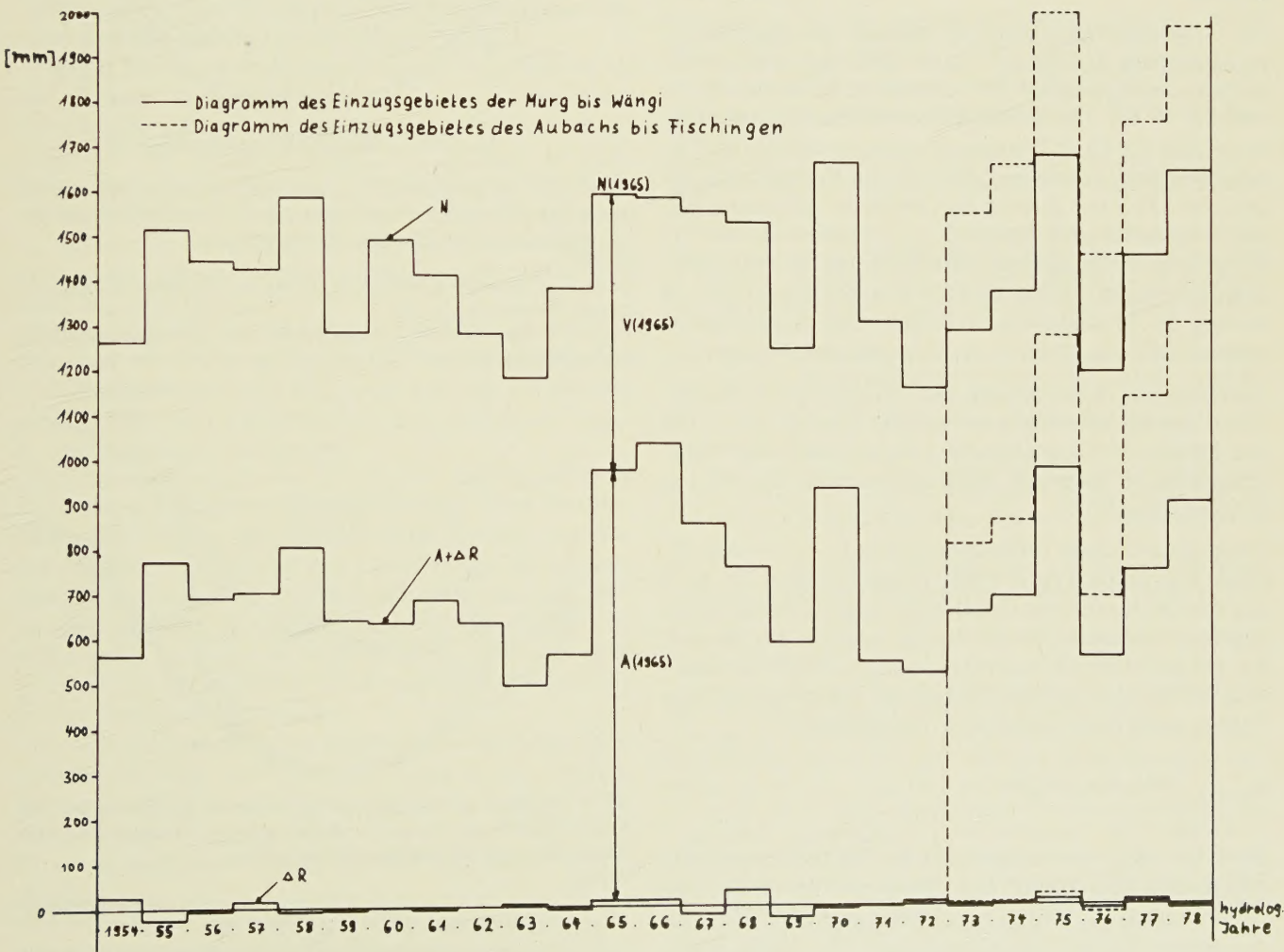


Fig. 7 Diagramm der jährlichen Wasserbilanzen

durch einen höheren Abfluss praktisch ausgeglichen wird, was sich auch in der Ähnlichkeit der Kurven des Niederschlags und des Nettoniederschlags zeigt.

Während der beobachteten 25 Jahre variiert innerhalb des Einzugsgebietes der Murg bis Wängi die Verdunstung zwischen 555 mm (im Jahr 1966) und 857 mm (im Jahr 1960), der Abfluss zwischen 488 mm (im Jahr 1963) und 1021 mm (im Jahr 1966), der Gebietsniederschlag zwischen 1158 mm (im Jahr 1972) und 1680 mm (im Jahr 1975); die entsprechenden Mittelwerte der 25 Jahre betragen 706 mm für die Verdunstung, 716 mm für den Abfluss und 1423 mm für den Gebietsniederschlag. [Für das Einzugsgebiet des Aubachs lauten die entsprechenden Beträge der beobachteten sechs Jahre: Verdunstung 619 mm (1977) – 800 mm (1974), Mittel = 723 mm; Abfluss 709 mm (1976) – 1306 mm (1978), Mittel = 1010 mm; Gebietsniederschlag 1458 mm (1976) – 2011 mm (1975), Mittel = 1735 mm.]

Die Beträge der Jahresverdunstung liegen somit relativ hoch, wobei aber zu beachten ist, dass durch die angewandte Methode der möglichst repräsentativen Bestimmung des Gebietsniederschlags höhere Werte als bei den üblichen Bestimmungen resultieren.

Simulation der Grundwasserverhältnisse des Murgtales mit Hilfe eines mathematischen Grundwasserströmungsmodells

Das Grundwasservorkommen entlang des Murglaufes von Dussnang bis Wängi wurde durch ein mathematisches Strömungsmodell (Finite-Element-Methode) dargestellt [8, 18 19]. Das grosse hydrologische Einzugsgebiet ausserhalb des Grundwasservorkommens machte die Erarbeitung einer speziellen Methode zur Abschätzung der seitlichen Zuflüsse notwendig (Methode der maximalen seitlichen Infiltrationsraten $q_{inf\ max}$). Dabei wird das hydrologische Einzugsgebiet ausserhalb des zur Modellsimulation ausgewählten Grundwassergebietes (Figur 1) entlang der Modellgrenze in Teileinzugsgebiete (anastossend an die Elementseiten der Grenzelemente) aufgeteilt.

Anschliessend wird entlang der Modellgrenze entsprechend den betreffenden anstossenden Elementseiten und den lokalen hydrogeologischen Verhältnissen eine Infiltrationsfläche festgelegt (siehe schematische Darstellung in Figur 8 und 9):

Entsprechend dieser Infiltrationsfläche $F_{inf} = L \cdot t$, der lokalen Durchlässigkeit K (bzw. Transmissivität $T = K \cdot t$) und dem hydraulischen Gradienten i (nur in der Grössenordnung abschätzbar) wird die im betreffenden Bereich des (Modell-)Grundwasservorkommens mögliche maximale Infiltrationsrate (und damit der maximale seitliche Zufluss zum Grundwasser) wie folgt definiert:

$$Q_{inf\ max} (m^3/s) = K \cdot i \cdot F_{inf} = K \cdot i \cdot L \cdot t = T \cdot i \cdot L$$

Wird nun noch der entsprechende, für die betreffende Teileinzugsgebietsfläche F_{Einz} mögliche maximale Gesamtzufluss $Q_{Z\ tot} = F_{Einz} \cdot N_{netto}$ betrachtet, so lässt sich der seitliche Zufluss zum Grundwasser Q_{inf} (Infiltration) durch folgende zwei Beziehungen festlegen:

$$\textcircled{a} \quad Q_{Z\ tot} = N_{netto} \cdot F_{Einz} = Q_{Z\ oberirdisch} + Q_{inf}$$

$$\textcircled{b} \quad Q_{inf} \leq Q_{inf\ max} = K \cdot i \cdot F_{inf}$$

Werden nun diese beiden Gleichungen durch die Fläche des Teileinzugsgebietes dividiert, so erhält man die folgenden Ausdrücke:

aus Gleichung 1:

$$\frac{Q_{Z\ tot}}{F_{Einz}} = \frac{N_{netto} \cdot F_{Einz}}{F_{Einz}} = \frac{Q_{Z\ oberirdisch}}{F_{Einz}} + \frac{Q_{inf}}{F_{Einz}}$$

$$\textcircled{a}' \quad N_{netto} = q_{Z\ oberirdisch} + q_{inf}$$

aus Gleichung 2:

$$\frac{Q_{inf}}{F_{Einz}} \leq \frac{Q_{inf\ max}}{F_{Einz}} = \frac{K \cdot i \cdot F_{inf}}{F_{Einz}}$$

$$\textcircled{b}' \quad q_{inf} \leq q_{inf\ max} = K \cdot i \cdot \frac{F_{inf}}{F_{Einz}}$$

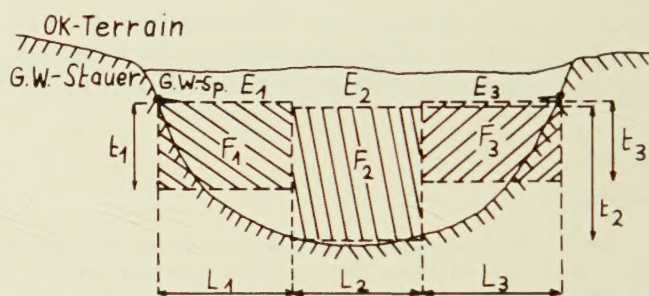


Fig. 8 Seitliche Zuflüsse zum Grundwassergebiet aus seitlich angrenzenden Seitentälern (Schema zur Aufteilung der Infiltrationsfläche des Talquerschnittes auf die einzelnen Elementseiten).

Wobei:

L_1, L_2, L_3 : Länge der Elementseite entlang der Grenzlinie der entsprechenden Elemente E_1, E_2, E_3 .

t_1, t_2, t_3 : mittlere Tiefe der entsprechenden, mit der Infiltrationsfläche flächengleichen Rechtecke F_1, F_2, F_3 , mit der Länge L_1 bzw. L_2, L_3 .

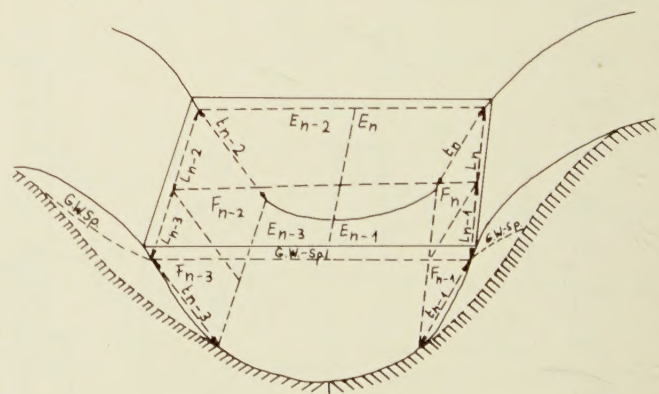


Fig. 9 Schematische Darstellung der seitlichen Infiltration bei Talflanken ohne Fluss (Schema zur Aufteilung der Infiltrationsfläche der Hangzuflüsse auf die einzelnen Elementseiten).

Wobei:

$L_{n-3}, L_{n-2}, L_{n-1}, L_n$: Länge der Elementseite entlang der Grenzlinie der entsprechenden Elemente $E_{n-3}, E_{n-2}, E_{n-1}, E_n$.

$t_{n-3}, t_{n-2}, t_{n-1}, t_n$: Ausdehnung in die Tiefe der subvertikalen bis vertikalen Infiltrationsflächen $F_{n-3}, F_{n-2}, F_{n-1}, F_n$.

Damit können nun die Infiltrationsraten q_{inf} bzw. $q_{\text{inf max}}$ ausgedrückt in [mm/Tag] oder [m/s] direkt mit dem Nettoniederschlag N_{netto} verglichen werden:

$q_{\text{inf max}}$ stellt dabei die maximale «*lamе d'eau*» oder «Wasserhöhe» dar, welche für ein Teileinzugsgebiet F_{Einz} mit der Eintrittsfläche F_{inf} ins Grundwassergebiet (Modellgebiet) infiltrieren kann. (Wie aus der Gleichung 1 hervorgeht, ist die Rate des Gesamtabflusses q_{tot} immer mit dem Nettoniederschlag identisch.) Mit Hilfe dieser beiden Beziehungen wird die Bestimmung der seitlichen Zuflüsse nach folgenden Überlegungen durchgeführt:

– Ist der Betrag des Nettoniederschlags N_{netto} kleiner oder gleich der maximalen Infiltrationsrate $q_{\text{inf max}}$ und ist kein oberirdischer Abfluss vorhanden, so wird angenommen, dass für das betreffende Teileinzugsgebiet der gesamte Abfluss infiltriert, und es wird somit: $N_{\text{netto}} = q_{\text{inf}}$ gesetzt.

– Ist der Betrag des Nettoniederschlags N_{netto} kleiner oder gleich der maximalen Infiltrationsrate $q_{\text{inf max}}$ und ein bekannter oberirdischer Abfluss $q_{\text{Z oberirdisch}}$ vorhanden, so wird angenommen, dass für das betreffende Teileinzugsgebiet nur der nicht oberirdisch abfließende Anteil des Gesamtabflusses infiltriert und es wird somit $N_{\text{netto}} - q_{\text{Z oberirdisch}} = q_{\text{inf}}$ gesetzt.

– Ist der Betrag des Nettoniederschlags N_{netto} grösser als die maximale Infiltrationsrate $q_{\text{inf max}}$, so wird, falls kein oberirdischer Abfluss bekannt ist, die Infiltration des betreffenden Teileinzugsgebietes gleich der maximalen Infiltrationsrate gesetzt, somit wird $q_{\text{inf}} = q_{\text{inf max}}$.

– Ist der Betrag des Nettoniederschlags N_{netto} grösser als die maximale Infiltrationsrate $q_{\text{inf max}}$ und ein bekannter oberirdischer Abfluss $q_{\text{Z oberirdisch}}$ vorhanden, so wird zur Kontrolle die Differenz ($N_{\text{netto}} - q_{\text{Z oberirdisch}}$) gebildet. Falls diese Differenz grösser als die maximale Infiltrationsrate ist, so wird die seitliche Infiltration $q_{\text{inf}} = q_{\text{inf max}}$ gesetzt, ist sie kleiner, so wird die seitliche Infiltration gleich dieser Differenz gesetzt und somit wird $q_{\text{inf}} = N_{\text{netto}} - q_{\text{Z oberirdisch}}$.

[Um q_{inf} zur Eingabe im Modell verwenden zu können, muss der Wert von q_{inf} entweder mit der zugehörigen Teileinzugsgebietsfläche F_{Einz} oder mit der Teileinzugsgebietsfläche pro Längeneinheit der Grenzlinie $F_{\text{Einz}}/L_j = B_j$ multipliziert werden.]

Nach dieser Methode wurden die bei Simulationen im stationären Zustand zur Eingabe erforderlichen Randbedingungen entlang des Modellrandes (in Form von Zuflussmengen) bestimmt. [Für die Bedürfnisse der Modellsimulationen wird der stationäre Zustand als eine Zeitspanne innerhalb des hydrologischen Kreislaufes ohne resultierende Reserveänderung definiert. Die einzelnen Grössen der Wasserbilanz werden dabei als Mittelwerte dieser Zeitspanne bestimmt].

Die Infiltrationen der Murg innerhalb des Modellgebietes wurden entweder auch über die Eingabe von Infiltrationsraten (in Abschnitten ohne direkte hydraulische Beziehung zum Grundwasser) oder durch die Eingabe von Wasserspiegelhöhen (Höhe des Murgspiegels) berücksichtigt.

Mit Hilfe dieser Modellsimulationen im stationären Zustand war es nun möglich, die Verteilung der Transmissivitäten (Durchlässigkeiten) innerhalb des Grundwasser-

vorkommens zu eichen. Dabei wurde das Modell sowohl auf die resultierende Potentialverteilung innerhalb des simulierten Grundwasservorkommens als auch auf die resultierende Verteilung der Zu- und Abflussmengen mit Hilfe der Modellbilanz geprüft. Die Modellbilanz ergibt durch den simulierten stationären Zustand (vom 19./20. März 1974) folgenden Aufschluss über die Speisung des Grundwasservorkommens: 32 % der Speisung erfolgte durch die Infiltration der Niederschläge in der Talsohle, 48 % durch seitliche Zuflüsse, 20 % durch direkte oder indirekte Infiltration der Murg.

Literatur

- [1] Geiger, E. (1943): Erläuterungen/Geol. Atlas der Schweiz, Blätter 56 Pfyn, 57 Märstetten, 58 Frauenfeld, 59 Dussnang. – Schweiz. Geol. Kommission.
- [2] Tanner, H. (1944): Beitrag zur Geologie der Molasse zwischen Ricken und Hörnli. – Diss. Uni Zürich.
- [3] Hantke, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete/Erläuterungen. – Kommissionsverlag Leemann, Zürich.
- [4] Hottinger, L., Matter, A., Nabholz, W., Schindler, C. (1970): Erläuterungen zu Blatt 1093 Hörnli, Geol. Atlas der Schweiz. – Schweiz. Geol. Kommission.
- [5] Andresen, H. (1964): Beiträge zur Geomorphologie des östlichen Hörnliberglandes. – Jb. st. gall. natur w. Ges. (1961–1962), 78.
- [6] Kanton Thurgau (1878): Bericht des Regierungsrathes des Kantons Thurgau an den Grossen Rath über die Wasserverheerungen im Jahre 1876 und über die bezüglichlichen Massnahmen. – J. Hubers Buchdruckerei, Frauenfeld.
- [7] Guldener, H. (1969): Die Wasserwirtschaft im Kanton Thurgau. – Verband Schweizerischer Abwasserfachleute VSA/ASPEE, Verbandsbericht Nr. 101/1.
- [8] Kiraly, L. (1978): La notion d'unité hydrogéologique, essai de définition. – Bull. Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel No 2, p. 83–216.
- [9] Balderer, W. (1979): Die Obere Süsswassermolasse als Hydrogeologisches Gesamtsystem. – Bull. Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel No 3, p. 27–39.
- [10] Jäckli, H.: Gutachten (Büro Dr. Jäckli, Zürich): Die Grundwasserverhältnisse im Murgtal zwischen Sirnach–Kett und der Autobahn N1, Gemeinde Sirnach (TG) (17. November 1975, Ergänzungsbericht).
- [11] Grundwasserverhältnisse im Murgtal zwischen Sirnach und St. Margarethen (TG) (27. 7. 1979).
- [12] Linert, O. (1974): Hydrogeologische Untersuchungen Murgtalabschnitt Dussnang/Oberwangen–Horben/Wiezikon. – Bericht an das Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau (26. 11. 1974).
- [13] Balderer, W. (1979): Hydrogeologie des Murgtales (TG), Manuscript de thèse, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, Bd. 1 und 2.
- [14] Eidg. Amt für Wasserwirtschaft: Hydrographisches Jahrbuch der Schweiz, 1954–1978.
- [15] Schweiz. Meteorologische Zentralanstalt (p.a.): Ergebnisse der täglichen Niederschlagsmessungen in der Schweiz. Zürich.
- [16] Siegert, E., Schrödter, H. (1975): Erfahrungen mit dem Wasserbilanzschreiber nach Klausing. – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilung. Jg. 19, H. 6.
- [17] Weyer, K. U. (1972): Ermittlung der Grundwassermengen in den Festgesteinen der Mittelgebirge aus Messungen des Trockenwetterabflusses. – Diss. Rheinische Friederich-Wilhelm-Universität Bonn.
- [18] Trösch, J. (1975): Numerische Simulation Dupuitscher Grundwasserströmungen. – Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Bd. 1 und Bd. 2, Nr. 14, 15.
- [19] Zienkiewicz, O. C. (1971): The finite element method in engineering science. – Mc. Graw-Hill, London.

Karten

- Balderer, W.* 1978: Hydrogeologisch-lithologische Karte des Einzugsgebietes des Aubachs, 1:5000, unveröffentlicht.
1978: Synthetische hydrogeologisch-lithologische Karte des Aubach-Gebietes (TG), 1:5000, unveröffentlicht.
Geol. Atlas der Schweiz (1943): Blatt 58 Frauenfeld.
Geol. Atlas der Schweiz (1970): Blatt 1093 Hörnli.
Geol. Generalkarte der Schweiz (1950): Blatt 3 Zürich-Glarus.
Geotech. Karte der Schweiz (1963): Blatt 2 Luzern-Zürich-St. Gallen-Chur.
Hantke, R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. – Verlag Leemann, Zürich.
Jäckli, H. (1967): Hydrogeologische Karte der Schweiz. – *Eclogae geol. Helv.* Vol. 60, 2.
Jäckli, H., Kempf, Th., und Mitarbeiter (1980): Hydrogeologische Karte der Schweiz, Blatt Bodensee. – Schweiz. Geotechn. Kommission, Zürich.

Adresse des Verfassers:

Dr. W. Balderer

Physikalisches Institut der Universität Bern, C-14 Labor

Sidlerstrasse 5, 3012 Bern

Privat: Eggweg 14, 3065 Bolligen
